

计及暂态稳定约束的电厂送出系统 重合闸时间整定方法研究

李兆伟¹, 贺静波², 方勇杰¹, 李威¹, 任先成¹, 刘福锁¹

(1. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要: 基于我国现行的安全稳定导则, 发电厂送出线路的重合闸时间可能直接影响电厂的送出能力。为保证电厂送出能力不因重合闸时间整定不合理而降低, 建立了考虑重合闸时间对系统暂态稳定性影响的数学模型。应用 EEAC (Extended Equal-Area Criterion) 暂态稳定量化分析方法研究了考虑重合闸时间的电厂送出系统暂态稳定特性, 提出了一种计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法。实际系统仿真表明, 利用该方法能快速确定重合闸时间整定的合理区间, 保证重合闸时间整定值满足系统暂态稳定要求。

关键词: 暂态稳定; 电厂送出系统; 重合闸时间; 扩展等面积法则

Research on the method to set reclosing time of power plant transmission system considering transient stability constraints

LI Zhao-wei¹, HE Jing-bo², FANG Yong-jie¹, LI Wei¹, REN Xian-cheng¹, LIU Fu-suo¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. National Power Dispatching and Control Centre, Beijing 100031, China)

Abstract: According to the current Guide on Security and Stability for Power System, the reclosing moment of power plant transmission lines directly affects the power plant transmission ability. This paper establishes a mathematical model of system transient stability affected by reclosing moment. The system stability characteristics considering reclosing time is studied based on Extended Equal-Area Criterion (EEAC) theory. An approach to setting the reclosing time considering transient stability is proposed. The actual power system simulation shows that it can identify the reasonable range of reclosing time quickly and ensure that the setting value of reclosing time meets the system transient stability requirement.

Key words: transient stability; power plant transmission system; reclosing time; EEAC

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0116-05

0 引言

电力系统中的大多数故障均为瞬时性故障, 采用自动重合闸可以提高系统供电的可靠性。对于永久性故障, 重合闸装置动作会对电力设备造成第二次冲击, 为避免重合于永久性故障对设备和系统的危害, 学者们开展了自适应重合闸理论的研究^[1-3]。

目前重合闸时间整定主要考虑以下因素: 线路两侧保护不同时的跳闸时间、保护跳闸后故障点电弧熄灭时间、故障点绝缘恢复时间、断路器再次灭

弧和跳闸时间以及一定的时间裕度。研究表明重合闸时间对电力系统暂态稳定性有较大影响^[4-6], 尤其按照现行的电力系统承受大扰动能力的安全稳定标准^[7], 电厂送出线路发生三相故障时可采取措施, 而单相永久故障时应满足 $N-1$ 要求, 因此发电厂送出线路重合闸时间是否合理可能直接影响电厂送出能力。目前已有大量学者对重合闸时间优化进行了研究^[8-16]。文献[8]从电力系统暂态稳定角度, 提出了最佳重合闸时机的概念, 认为当角度达到最大值并开始减小, 角速度为负并在达到最大值之前进行重合, 可提高系统阻尼, 不会因第二次故障冲击使系统失步。文献[9]和文献[10]分别对瞬时性故障和永久性故障下的最佳重合闸时刻进行研究, 认为

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题 (SGCC-MPLG003-2012)

最佳重合闸的条件为重合成功后系统的暂态能量最小。文献[11-12]基于 EEAC 暂态稳定量化分析方法, 对多机系统输电线路的重合闸时间进行优化, 提出了重合闸时间在线优化的构想。最优重合闸时间与运行方式密切相关, 运行方式改变后最优重合闸时间需重新整定, 就目前而言对线路重合闸时间进行实时整定较难实现, 因此基于现行的安全稳定标准, 研究计及暂态稳定约束的重合闸整定方法, 对保证系统安全稳定运行、提高电厂送电能力更具实际意义。

本文基于 EEAC 暂态稳定量化分析方法, 建立了单相永久性故障下考虑重合闸时间对系统稳定性影响的数学模型, 研究了单相永久性故障下为保证系统稳定运行对重合闸时间的要求, 提出了一种计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法, 实际系统仿真表明重合闸时间对电厂送出系统的送电能力有较大影响, 合理的重合闸时间可有效提高电厂送出能力。

1 数学模型

EEAC^[17]是一种电力系统暂态稳定性量化分析方法, 其基本思想是根据系统运行工况和故障条件将多机电力系统等值为单机无穷大系统, 在此基础上应用等面积法则^[18]进行暂态稳定分析。EEAC 从系统实际受扰轨迹出发, 由于是在全模型的积分空间中完成数值积分, 所以仿真轨迹中包含了完整的非线性、非自治因素的影响。然后将得到的受扰轨迹通过线性保稳变换映射为一系列观察平面上的时变单机无穷大系统 (TV-OMIB) 映像轨迹。每个映像平面对应一种振荡模式, 将系统中的发电机按一定规则划分为互补的领前群和余下群, 而映像轨迹则反映了两群间的相互运动, 其中稳定裕度最小的映像 (称为主导映像) 代表系统的主导模式, 主导模式分群就是稳定裕度最小的分群方式。下面利用 EEAC 量化分析方法对系统发生单相永久性故障后考虑重合闸动作的数学模型进行分析。

根据系统主导模式分群得到领前群 S 和余下群 A , 系统的单机无穷大等值数学模型为^[19]

$$M\ddot{\delta} = P_m - P_e = P_m - P_c - P_{\max} \sin(\delta - \gamma) \quad (1)$$

式中: $M = \frac{M_A M_S}{M_A + M_S}$, $M_S = \sum_{i \in S} M_i$, $M_A = \sum_{j \in A} M_j$;

$\delta = \delta_S - \delta_A$, $\delta_S = \left(\sum_{i \in S} M_i \delta_i \right) / M_S$, $\delta_A = \left(\sum_{j \in A} M_j \delta_j \right) / M_A$;

$P_m = \frac{M_A \sum_{i \in S} P_{mi} - M_S \sum_{j \in A} P_{mj}}{M_S + M_A}$; $P_c = \frac{M_A}{M_S + M_A} \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} E_i E_k G_{ik}$ -

$\frac{M_S}{M_S + M_A} \sum_{j \in S} \sum_{l \in S} E_j E_l G_{jl}$; $P_{\max} = \sqrt{C^2 + D^2}$; $\gamma = -\tan^{-1} \frac{C}{D}$;

$C = \frac{M_A - M_S}{M_S + M_A} \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} E_i E_j G_{ij}$; $D = \sum_{j \in A} \sum_{i \in S} E_i E_j B_{ij}$ 。

设某电厂送出线路发生单相永久性接地故障, 故障期间系统等值功角特性曲线 P_e (见图 1), 跳开故障相、系统非全相运行期间等值功角特性曲线 P_e' , 故障线路三相跳开后系统等值功角特性曲线 P_e'' , 相应的功角特性表达式为

$$\begin{cases} P_e = P_c + P_{\max} \sin(\delta - \gamma) \\ P_e' = P_c' + P_{\max}' \sin(\delta - \gamma') \\ P_e'' = P_c'' + P_{\max}'' \sin(\delta - \gamma'') \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中各功角特性表达式中的 P_c , P_{\max} 及 γ 可由式(1)及相应各阶段的节点导纳矩阵确定。

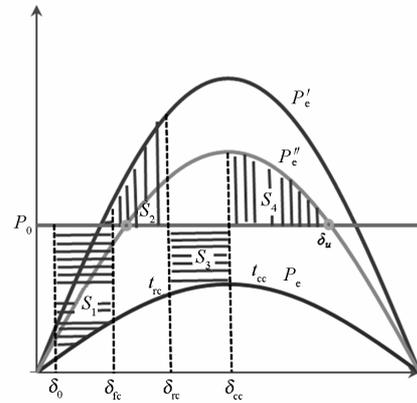


图 1 不同阶段系统等值 OMIB 功角曲线

Fig. 1 Angle curves of equivalent OMIB in different stages

假设第一次故障时间为 t_0 , 第一次切除故障相时间为 t_{fc} , 重合闸时间为 t_{rc} , 故障线路三相跳开时间为 t_{cc} , 则整个故障过程中系统加速面积 S_{acc} 及最大减速面积 S_{dec} 分别为

$$\begin{cases} S_{acc} = S_1 + S_3 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} (P_0 - P_e) d\delta + \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{uc}} (P_0 - P_e) d\delta \\ S_{dec} = S_2 + S_4 = \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{rc}} (P_e' - P_0) d\delta + \int_{\delta_{rc}}^{\delta_{uc}} (P_e'' - P_0) d\delta \end{cases} \quad (3)$$

式(3)即为考虑重合闸时间影响的系统加速面积和减速面积的表达式。假设继保切除故障时间为定值, 除 S_1 外, S_2 、 S_3 、 S_4 均受重合闸时间的影响, S_{acc} 和 S_{dec} 可看作重合闸时间的函数。定义系统的稳定裕度^[17]为

$$\Delta V_n = \frac{S_{dec} - S_{acc}}{S_{acc}} \quad (4)$$

求解 $\Delta V_n=0$ 即可得到系统临界稳定时对应的重合闸时间 t_{rc} ，从而得到系统稳定运行时对应的重合闸时间区间，即考虑重合闸时间的系统稳定域。此数学模型的意义在于，对永久性故障而言，存在重合闸带来的二次冲击（机组第二次加速），由于不同的重合闸时间造成的冲击不同，因此系统的稳定域需考虑重合闸时间的影响。实际运行中，需充分考虑电厂送出能力与重合闸时间的耦合关系（非电厂出线路的校核故障一般为三相故障，不需考虑重合闸时间的影响）。

式(4)的解析解较难求取，本文采用数值积分仿真程序获得系统达到临界状态时的重合闸时间。

2 计及重合闸时间的电厂送出系统稳定域确定方法

为提高仿真效率，下面定性描述故障后重合闸时间对系统稳定性的影响，以单机无穷大系统送出线路发生单相永久接地故障为例说明。

如图 2 给出了故障后不同阶段系统功角曲线示意， P_e 、 P_e' 、 P_e'' 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 意义同前， $(\omega_{fc}, \delta_{fc})$ 表示故障相切除瞬间机组的角速度和功角。非全相运行期间，系统初始状态为 $(\omega_{fc}, \delta_{fc})$ ，经过短路期间的加速过程，机组转速大于同步速，功角增大，由于机械功率仍大于电磁功率，机组保持加速；直至 (ω_{max}, δ_s) ，由于机组转速仍大于同步转速，功角继续增大，电磁功率开始大于机械功率，机组减速；直至 (ω_0, δ_{max}) 状态，机组减速到同步转速，功角达到最大值，此时电磁功率仍小于机械功率，机组继续减速，功角开始减小；直至 (ω_{min}, δ_s) 状态，机组转速减速到最小值，功角重新回到平衡点值；由于机组转速小于同步转速，功角开始减小，机械功率开始大于电磁功率，机组加速；直至 (ω_0, δ_{min}) 状态，机组加速到同步转速，功角达到最小值，机组开始加速，循环往复。

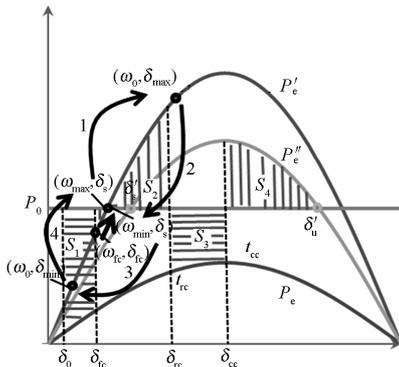


图 2 故障后各阶段机组功角曲线

Fig. 2 Angle curves in different stages after fault

比较图 2 中在 1 阶段重合闸和在 2 阶段重合闸系统的暂态稳定性。分别在 1 阶段和 2 阶段上取功角相同的两个点 (ω_1, δ) 和 (ω_2, δ) ，对应的时刻为 t_1 和 t_2 ，由于 1 阶段和 2 阶段机组均在减速，显然有 $\omega_1 > \omega_2$ ，分别在 t_1 和 t_2 时刻重合闸，重合闸后经过相同时间跳开故障线路，简单推导可知在 t_1 时刻重合机组的转速及功角比在 t_2 时刻大（ t_2 时刻重合瞬间机组转速小于同步速，功角先减小后增大），则 t_1 时刻重合系统减速面积 S_2 、 S_4 较小而加速面积 S_3 较大（等效于 t_1 时刻重合系统暂态能量较大^[10]），系统暂态稳定裕度较小，由此可以说明在 1 阶段重合闸系统稳定性较差。同理定性比较在其他阶段重合闸时系统的暂态稳定性，可知在图 2 中 1 阶段进行重合系统稳定性最差，在 3 阶段重合系统稳定性最好。仿真时，可从 (ω_{max}, δ_s) 、 (ω_0, δ_{max}) 、 (ω_{min}, δ_s) 、 (ω_0, δ_{min}) 四个状态出发，迭代仿真，最终获得当前方式下系统临界稳定时对应的重合闸时间，从而确定系统稳定运行时合理的重合闸时间区间，即计及暂态稳定约束的重合闸合理整定区间。

总之，重合闸时间不是越短越好，也不是越长越好。实际运行中，应考虑系统恶劣方式及严重故障，如对同杆并架线路，还需考虑异名相永久接地故障（ $N-2$ ）时重合闸时间对系统稳定性的影响。根据上述方法确定重合闸时间的合理范围，使重合闸时间整定值能满足系统暂态稳定要求，确保电厂送出系统达到相应的安全稳定标准。

3 算例及分析

某实际电厂送出系统示意图如图 3 所示，共有 8 台机组，装机 330 万 MW，其送出线路的单相重合闸时间整定为故障后 850 ms 左右，现有安控配置下发生异名相永久故障后最大需切除 4 台机组。下面利用上文提出的方法分析该系统计及暂态稳定约束的重合闸时间合理整定区间。

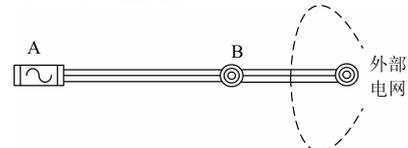


图 3 实际电厂送出系统示意图

Fig. 3 Schematic of some actual power plant transmission system

考虑电厂满发，其送出线路发生异名相永久性接地故障，考虑控制措施，校核不同重合闸时间下系统的安全稳定特性。系统非全相运行下的功角、转速响应曲线如图 4 所示。从图中可知，故障后 0.2 s A 厂机组转速加速到最大（首摆）；0.6 s 功角达到最

大值, 转速等于同步速; 1 s 转速减速至最小; 1.5 s 功角达到最小值, 转速等于同步速。分别在这四个时刻进行重合闸, 仿真结果如图 5、图 6 所示。

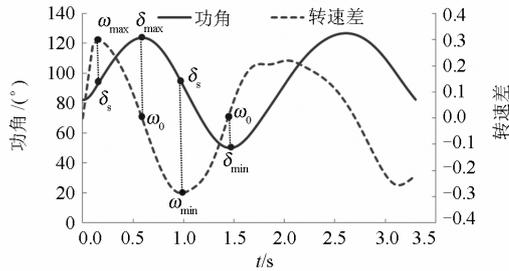


图 4 系统非全相运行下的功角、转速响应曲线

Fig. 4 Response curves of power angle and rotate speed during open phase operation

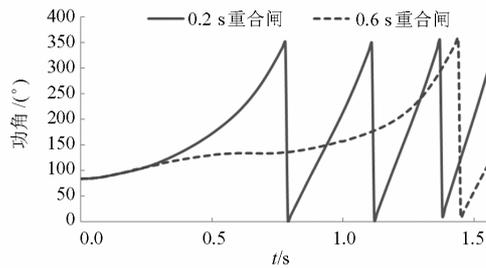


图 5 不同时刻重合闸功角曲线比较 1

Fig. 5 Comparison of power angle from different reclosing time

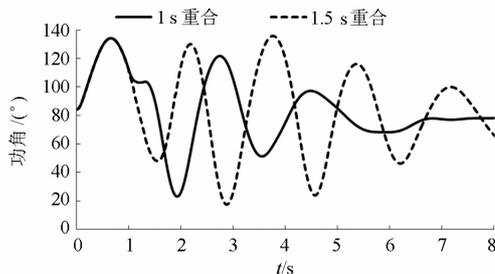


图 6 不同时刻重合闸功角曲线比较 2

Fig. 6 Comparison of power angle from different reclosing time

由仿真结果可以看出, 0.2 s 和 0.6 s 重合闸后系统功角失稳, 1 s 和 1.5 s 重合闸后系统功角稳定, 且 1 s 重合闸系统稳定裕度更高, 通过迭代仿真得到该方式下保证系统暂态稳定的重合闸时间区间为 [0.7 s, 1.6 s] (单相永久性故障下仿真结果为 [0.5 s, ∞), 而实际线路的重合闸整定值约为 0.85 s, 属于区间内, 从系统暂态稳定角度而言该定值合理。对当前方式及给定故障而言, $(\omega_{\min}, \delta_k)$ 对应的时刻 1 s 为最优重合闸时间, 系统稳定裕度最高, 即在转速达到最小时进行重合闸系统稳定裕度最高。

4 结论

根据导则规定, 发电厂送出线路发生单相永久性接地故障时应满足 $N-1$ 准则, 因此线路的重合闸时间对电厂送出系统的送电能力有较大影响。本文基于 EEAC 量化分析方法分析了单相永久性接地故障重合闸时间对系统暂态稳定性的影响, 提出了一种计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法。实际运行中, 应考虑系统运行的恶劣方式及严重故障, 根据上述方法确定重合闸时间的合理范围, 使重合闸时间整定值能满足系统暂态稳定要求。通过实际系统仿真验证了方法的有效性, 可为调度运行提供决策支持。

参考文献

- [1] 林湘宁, 刘海峰, 鲁文军, 等. 基于广义多分辨率形态学梯度的自适应单相重合闸方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 27(7): 101-106.
LIN Xiang-ning, LIU Hai-feng, LU Wen-jun, et al. Generalized multi-resolution morphological gradient based self-adaptive single-phase reclosure scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 101-106.
- [2] 李博通, 李永丽. 基于故障点电压特性的同杆双回线自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 46-54.
LI Bo-tong, LI Yong-li. An adaptive autoreclosure technique for double-circuit transmission line based on voltage characteristics at fault point[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 46-54.
- [3] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 140-147.
LIANG Zhen-feng, SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [4] 王梅义, 吴竞昌, 蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [5] 束洪春, 孙士云, 董俊. 单相重合时序对系统暂态稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 1-4.
SHU Hong-chun, SUN Shi-yun, DONG Jun. Influence of single-phase reclosing sequence on system transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(3): 1-4.
- [6] 孙士云, 束洪春, 于继来. 单相重合时序对特高压交

- 直流并联系统暂稳影响的机理分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 107-113.
SUN Shi-yun, SHU Hong-chun, YU Ji-lai. Mechanism analysis of single-phase reclosure sequence's influence on ultra-high voltage AC/DC parallel system[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 107-113.
- [7] 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [8] 张保会, 袁越. 最佳重合闸时间及其整定计算[J]. 中国电力, 1995, 28(2): 12-17.
ZHANG Bao-hui, YUAN Yue. Optimal reclosing time and its setting calculation[J]. Electric Power, 1995, 28(2): 12-17.
- [9] 袁宇春, 张保会, 钱国明. 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究——第 1 部分 瞬时性故障最佳重合闸时刻的研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(4): 16-18.
YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, QIAN Guo-ming. Study on the optimal reclosing time in multi-machine power system——part one study on the optimal reclosing time at instantaneous fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(4): 16-18.
- [10] 袁宇春, 张保会, 阎海山. 多机电力系统中重合闸最佳时刻的研究——第 2 部分 永久性故障最佳重合闸时刻的研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(6): 46-48.
YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui, YAN Hai-shan. Study on the optimal reclosing time in multi-machine power system——part two study on the optimal reclosing time at permanent fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(6): 46-48.
- [11] 袁宇春, 张保会. 基于 EEAC 的重合闸最佳时刻的计算[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 10-12.
YUAN Yu-chun, ZHANG Bao-hui. Calculation of the optimal reclosing time based on EEAC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 10-12.
- [12] 贾晶晶, 龚庆武, 李勋. 融合轨迹预测技术的输电线路新型自适应重合闸[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 209-215.
JIA Jing-jing, GONG Qing-wu, LI Xun. A new type of adaptive reclosing merged with trajectory prediction for transmission lines[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 209-215.
- [13] 周德才, 张保会, 赵慧梅. 最佳重合闸方案的研究[J]. 继电器, 2005, 33(1): 28-33.
ZHOU De-cai, ZHANG Bao-hui, ZHAO Hui-mei. Study of a scheme of optimal auto-reclosing[J]. Relay, 2005, 33(1): 28-33.
- [14] 齐亮, 刘晓东, 张海栋, 等. 发电厂送出线重合闸时刻的在线优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 52-56.
QI Liang, LIU Xiao-dong, ZHANG Hai-dong, et al. Research on reclosing-time online optimization of power plant transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 52-56.
- [15] 吴烈, 古斌, 谭建成. 一种基于功率增量的高压线路保护选相元件[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 125-129.
WU Lie, GU Bin, TAN Jian-cheng. A fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on power increment[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 125-129.
- [16] 李召兄, 文俊, 徐超, 等. 特高压同塔双回输电线路的潜供电流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 148-154.
LI Zhao-xiong, WEN Jun, XU Chao, et al. Secondary arc current of UHV double-circuit transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 148-154.
- [17] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论—非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [18] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [19] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-06-18

作者简介:

李兆伟 (1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: lizhaowei2@epri.sgcc.com.cn

贺静波 (1983-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行、电力系统稳定性分析;

方勇杰 (1964-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。